

INCISIÓN DEL LECHO DEBIDO A LAS EXTRACCIONES DE ÁRIDOS

Martín-Vide, J.P. y Ferrer-Boix, C.

Universitat Politècnica de Catalunya
Jordi Girona 1-3, D1. 08034 Barcelona. España
E-mail: vide@grahi.upc.edu, carles.ferrer@upc.edu

RESUMEN

Se ha investigado el proceso de incisión del río Gállego, un afluente del río Ebro cuyo área de cuenca es de 4000 km² aproximadamente, en la vertiente sur de los Pirineos (NE de España). Se ha obtenido información topográfica histórica del perfil longitudinal desde los años 40. Esta información ha posibilitado la comparación de perfiles longitudinales del río. Además, de la búsqueda de información en archivos se sabe que el volumen de material extraído como árido para construcción es de casi 1 millón de m³, mientras que el volumen de material perdido debido a la incisión en el mismo periodo es de casi 2 millones de m³. Este fenómeno se explica a través de un modelo simple de transporte basado en ecuaciones de capacidad y un algoritmo que determina si el transporte de fondo está condicionado por la capacidad de transporte o por la disponibilidad de material. Del análisis se deduce que el proceso de incisión ha cambiado la magnitud de las tensiones tangenciales en el fondo, ya que a medida que el río se encaja o incide, mayores caudales caben dentro del cauce antes de desbordar por las llanuras de inundación.

ABSTRACT

Historical information was used to study river degradation in a case study in NE Spain. The accumulation of good topographical information since the 1940s for the Gállego river (a tributary of the Ebro river, which drains about 4,000 km² of the southern slopes of the Pyrenees) enables a comparison of longitudinal bed profiles. Historical research has also revealed the volume of gravel mined, which amounts to ≈ 1 million m³ compared to the volume of alluvium lost due to incision in the same period, which is ≈ 2 million m³. This unbalance is explained by a simple model based on a bedload equation and an algorithm to determine whether effective bedload transport is controlled by transport capacity or by the supply of sediment. It follows from the analysis that the incision process has changed the magnitude of the shear stresses on the bottom. This is because, as the river becomes degraded, higher discharges fit into the main channel before spilling.

INTRODUCCIÓN

El río Gállego drena aproximadamente 4000 km² de la vertiente sur de los Pirineos. Su desembocadura en el Ebro, el mayor río del país, se sitúa muy cerca de Zaragoza, cuya población es de 800,000 habitantes (Fig. 1). Se espera que el desarrollo de la ciudad alcance en pocos años las riberas del río. Ésta fue la motivación de un estudio cuyos puntos principales fueron un análisis del riesgo de inundación y un estudio morfodinámico del río. Los datos, las discusiones y las conclusiones respecto a la morfodinámica de este río de gravas es de lo que se trata en este artículo.

El río Gállego es un río regulado por tres presas: La Peña (construida en 1913 y con volumen útil de 25 hm³), Ardisa (1932 y 5.3 hm³) y Búbal (1971 y 64 hm³). Se dispone de los datos de una estación de aforos al pie de la presa de Ardisa cuya serie cubre el periodo 1913-1987. El tramo objeto de estudio abarca los últimos 20 km, los más cercanos a la desembocadura (Fig. 1), donde los cambios en la planta y en el perfil han sido mayores en las últimas décadas. A 11 km de la desembocadura se sitúa un pequeño azud (Urdán). Aunque la estación de aforos de Ardisa está a cierta distancia del área de estudio, sus datos (caudales medios diarios y de avenidas) se consideran válidos debido a las pocas aportaciones que recibe el Gállego entre la estación y el tramo de estudio y a la aridez de dicha zona. Del análisis de la curva de caudales clasificados de los 76 años de datos se obtiene un caudal $Q_1 = 374$ m³/s, representativo de los 76 datos más elevados, $Q_2 = 241$ m³/s, media de los segundos 76 datos más elevados, y sucesivamente, $Q_3 = 207$ m³/s y $Q_4 = 177$ m³/s. El caudal punta correspondiente a un periodo de retorno de 500 años alcanza los 1765 m³/s mientras el correspondiente al periodo de retorno de 50 años es de 1,210 m³/s. En las últimas décadas una avenida alcanzó 1,260 m³/s.

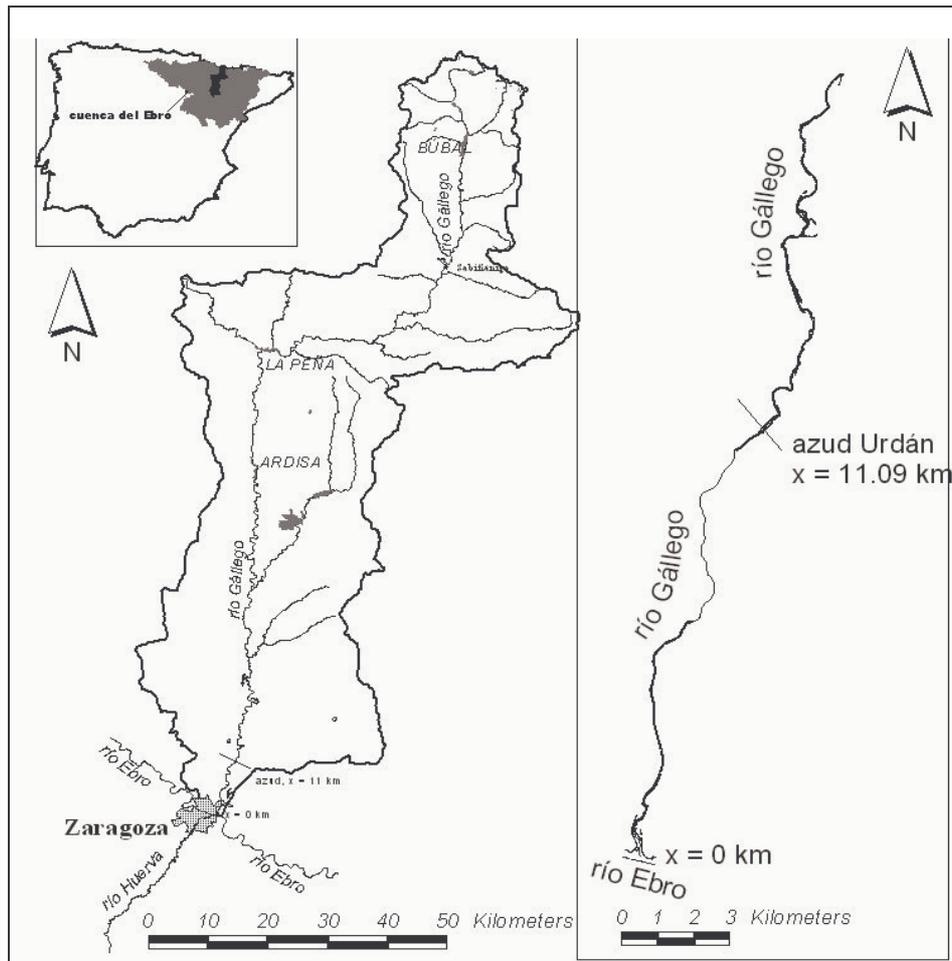


Figura 1.- Plano de situación y tramo de estudio.

La Figura 2 es una fotografía del río hacia aguas abajo tomada el año 2004 a 9 km (coordenada $x = 9$ km) de la desembocadura en el Ebro. La margen izquierda se mantiene a la misma altura que la llanura de inundación original (años 40), mientras la margen derecha ha sido erosionada durante el proceso de incisión. Nótese el tamaño grueso del material tanto de los depósitos como de las márgenes. En este tramo se han producido erosiones superiores a los 5 m. La vegetación ha desaparecido prácticamente en las riberas y las llanuras de inundación.



Figura 2.- Fotografía del río (hacia aguas abajo) mostrando la incisión producida.



Figura 3.- Cambios en planta del río Gállego: 1946(izquierda), 1957 (centro) y 2004 (derecha).

DESCRIPCIÓN DE LA INCISIÓN

En el tramo de estudio y durante las últimas décadas se han producido grandes incisiones. Al proceso de incisión lo ha acompañado un espectacular cambio en planta, pues se ha pasado de un río muy ancho, divagante y trezado hasta la década de los años 60 a un río con un único cauce con poca sinuosidad en el año 2004 (la Figura 3 muestra este cambio en planta). Se ha obtenido, después de una intensa búsqueda de datos cartográficos del perfil longitudinal, una comparación de perfiles correspondientes a distintas épocas. La Figura 4 resume la información reunida, que incluye datos de mitad de siglo, mediados de la década de los 70 así como de 1992 y 2004.

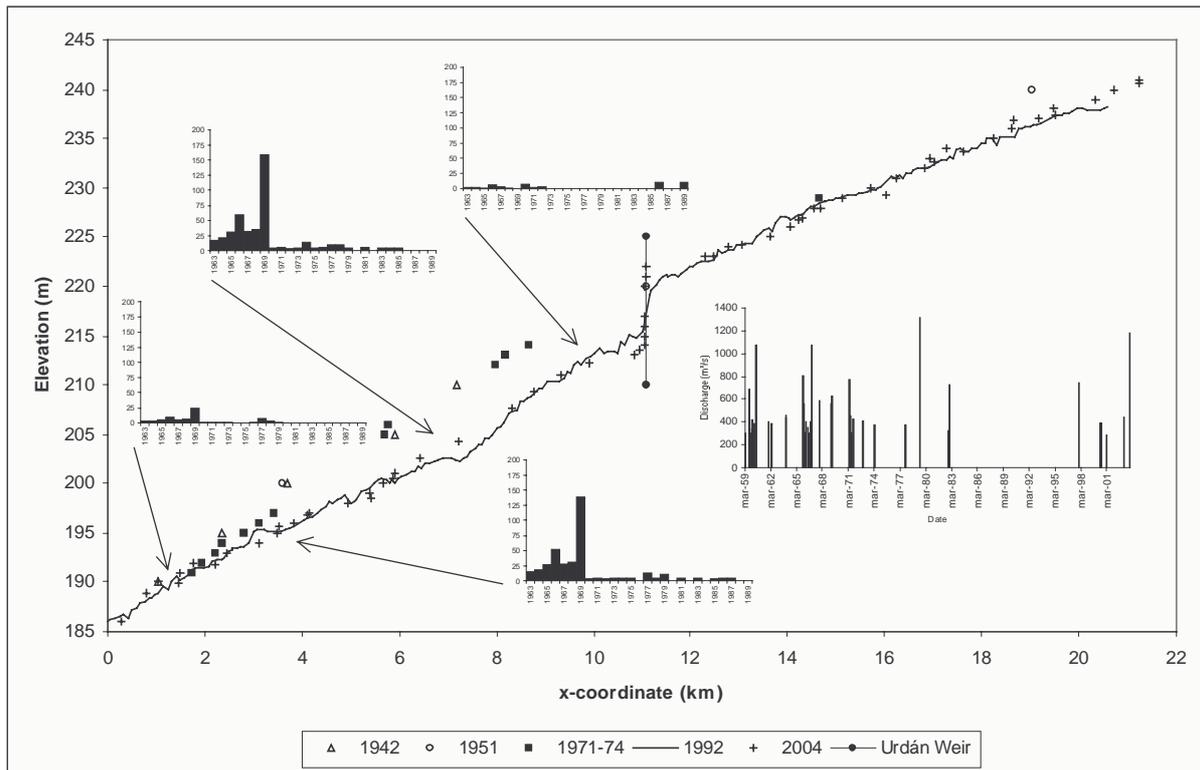


Figura 4.- Perfil longitudinal en distintas épocas. Obsérvense los histogramas de las extracciones llevadas a cabo (en miles de m³) y su ubicación. También se adjunta el histograma de los caudales punta de las avenidas más importantes registradas en Ardisa desde el año 1959.

Del análisis de la Figura 4 se desprenden claramente algunas consideraciones. En primer lugar, no se observan incisiones significativas con anterioridad a los datos de principio de los 70. El perfil longitudinal original o inicial del río (cuando su morfología aún era trenzada), era ligeramente convexo, lo que nos hace pensar en una pérdida de caudal líquido a medida que se avanza en la dirección de la corriente. En segundo lugar, se han producido graves erosiones aguas abajo del azud de Urdán desde aquel momento. Dicho azud parece haber actuado como condición de contorno inferior del tramo superior y ha impedido el avance de la erosión hacia aguas arriba. La incisión observada no es un proceso uniformemente distribuido en el tramo inferior sino que parece localizarse un “nickpoint” en la coordenada $x = 7.5$ km, en el cual se han producido descensos de la cota del lecho superiores a los 5 m. Los datos de 2004 parecen indicar una cierta suavización del perfil longitudinal en este punto. En el periodo de 1992-2004 el río se encaja o incide al pie del azud y parece darse un proceso de acreción en el entorno del “nickpoint”. La pendiente longitudinal se suaviza aguas abajo del azud y aumenta en el “nickpoint” y aguas abajo de éste. La máxima incisión, sin embargo, se mantiene superior a los 5 m.

EXTRACCIÓN DE ÁRIDOS

La Figura 4 muestra la información de mayor relevancia para explicar el proceso de incisión que ha sufrido el río Gállego durante las últimas décadas. La búsqueda en los archivos de la Administración Hidráulica ha permitido la cuantificación y la localización de las zonas de extracción, tanto del cauce principal como de las llanuras de inundación activas. El volumen de áridos extraídos (en miles de m³) desde 1963 se muestra en los cuatro histogramas de la Figura 4. Las flechas indican la localización del centro de cada zona de extracción. Para el análisis se han realizado dos hipótesis. La primera, que el material extraído en una concesión, ha sido extraído en su totalidad el mismo año en que ha sido concedida la extracción, mientras que la segunda hipótesis es que el volumen extraído coincide con el volumen concedido. Un vistazo a la Figura 4 da fuerza a la tesis de que ninguna otra causa puede explicar tal proceso de incisión.

Un hecho interesante en la Figura 4 es que las erosiones avanzan aguas arriba desde los centros de las zonas de extracción o graveras, lo que significa una propagación hacia aguas arriba de la erosión del lecho. Por ejemplo, la gran erosión al pie del azud debe haber sido causada por la extracción cercana al “nickpoint” y no por la extracción más cercana al azud, la cual es mucho menor. En la misma Figura 4, se ha insertado la historia de las avenidas más importantes desde 1959, para mostrar los eventos que pueden haber activado el transporte de sedimentos y la dinámica del cauce, sin menospreciar la magnitud de los caudales medios diarios más elevados de la curva de caudales clasificados (Q1, Q2, ...) que pueden haber jugado un papel importante en el transporte de sedimentos.

Tabla 1.- Valores medios de la incisión en distintas épocas.

Distancia	incisión 1962-1987	incisión 1988-2004
km	m	m
0-1.83	-0.99	-
1.83-3.50	-2.00	-
3.50-5.80	-3.64	-
5.80-8.30	-4.86	-0.40
8.30-11.09	-3.36	-1.47

La Tabla 1 resume la erosión del lecho en dos periodos de tiempo (el signo menos significa descenso). Los valores de la tabla se han obtenido promediando el descenso del lecho para cada uno de los tramos considerados. El primer periodo de 26 años corresponde con el periodo en que se dieron permisos de extracción de áridos, mientras que en el segundo periodo de 17 años no se concedió ningún permiso. Un hecho interesante es que la erosión del lecho no se detiene una vez las extracciones han finalizado. Este hecho sugiere la existencia de una cierta “inercia” en el comportamiento del perfil longitudinal del río. De la misma manera nótese que la erosión del lecho empezó a principios de 1970 mientras que las extracciones se habían iniciado a mediados de los 60 (Fig. 4).

La Tabla 2 muestra los parámetros característicos del material del lecho para distintas coordenadas longitudinales. Se han tomado muestras de material *sub-superficial* que han alcanzado los 200-300 kg y muestras de material superficial mediante el método de conteo de Wolman. Todas las muestras han sido tomadas en el cauce principal en agosto de 2004. Las muestras superficiales no han sido corregidas por ningún factor de conversión a muestras volumétricas. El diámetro medio D_m se ha calculado usando el parámetro ψ . La Tabla 2 muestra que el río está acorazado (ver la diferencia entre el D_m superficial y el sub-superficial). Esta diferencia es mayor aguas abajo que aguas arriba del azud, y puede relacionarse con el proceso de incisión que llevaría consigo un proceso de acorazamiento del lecho. Los diámetros medios no presentan un cambio de tamaño significativo a lo largo de la coordenada longitudinal. La desviación típica granulométrica del tamaño de grano tiene un comportamiento habitual en la medida en que es menor para las muestras superficiales que para el material *sub-superficial*.

Tabla 2.- Tamaño del material aluvial a lo largo del río.

x-coord	D_m	σ_g	D_m^*	σ_g^*
km	mm	mm	mm	mm
1.48	19.7	1.84	58.3	1.53
5.38	14.1	2.00	102.6	2.11
7.27	10.6	2.61	104.9	1.77
9.30	11.9	2.38	145.2	1.38
12.99	20.1	2.64	95.5	1.41
17.64	25.5	2.16	89.9	1.92

*muestras superficiales

MODELO DE TRANSPORTE SÓLIDO

Se ha elaborado un modelo simple de transporte basado en un balance de masa y se ha aplicado al tramo de estudio del río Gállego. Los 20 km de río de interés se han dividido en 8 tramos (véanse los 5 tramos más cercanos a la desembocadura en la Tabla 1). El modelo está basado en una ecuación de transporte de fondo y en un algoritmo que determina si el transporte está controlado por la capacidad de transporte o por la disponibilidad de material (Martín-Vide, 2002). El balance de masa compara el volumen que entra y que sale de cada tramo. Se han usado 4 fórmulas de transporte sólido: Einstein-Brown (E-B), Meyer-Peter and Müller (MPM), Smart-Jaeggi (S-J), (Rickenmann, 1991), (Smart, 1984) y finalmente la fórmula de Parker (Parker, 1990). Ésta última ecuación es capaz de calcular la distribución por fracciones del material transportado por tramos. Sin embargo, todas las ecuaciones se han aplicado por fracciones de material, pues a veces el balance de masa de una cierta fracción granulométrica está controlado por la capacidad y otras veces por la disponibilidad de material. La disponibilidad se obtiene a través de la misma ecuación de transporte aplicada con las características geométricas y del material del tramo situado inmediatamente aguas arriba. Las tensiones tangenciales se han calculado promediando los resultados de un modelo hidráulico en régimen permanente gradualmente variado (HEC-RAS). La geometría de entrada de dicho modelo procede de cartografía del año 2004. El modelo se ha ejecutado para cada caudal de la curva de caudales clasificados (Q1, Q2, ...), si bien para la mayoría de éstos el transporte final es nulo o muy pequeño y también se aplica con los caudales de los hidrogramas de las avenidas más importantes del periodo 1962-1987, discretizados en pasos de tiempo de 1 hora. Ambos resultados han sido sumados para obtener el resultado final.

A continuación se detalla un análisis básico del proceso de incisión mostrado en la Figura 4, únicamente para los 11 km de río situados aguas abajo del azud de Urdán. Durante el periodo 1962-1987, el volumen total de material extraído fue de 965,000 m³. Por contra, durante el periodo 1988-2004, no se concedió ninguna licencia de extracción. Los volúmenes de material perdido, obtenidos a través de integración del perfil longitudinal (de igual manera que en las incisiones de la Tabla 1), fueron 1,818,200 m³ entre 1962 y 1987 y 346,000 m³ entre 1988 y 2004. Combinando estos valores con los resultados del modelo de transporte se obtiene el siguiente balance de sedimentos:

$$(\text{Volumen entra}) - (\text{Volumen sale}) - (\text{Volumen extraído}) = (\text{Cambio Volumen})$$

Tabla 3.- Balance de sedimentos para las cuatro ecuaciones de transporte utilizadas.

Periodo	Balance E-B	Balance MPM	Balance S-J	Balance Parker
	m ³	m ³	m ³	m ³
1962-1987	-1,010,000	203,000	776,000	831,000
1988-2004	-1,130,000	181,000	321,000	331,000

Las dos primeras cantidades provienen del modelo de transporte. Las otras dos provienen del análisis anterior. El cambio de volumen es negativo (pérdida de material). Nótese que el volumen total perdido no debe equilibrarse únicamente con el volumen extraído, sino que también debe intervenir la diferencia entre el material transportado que entra y que sale del tramo de estudio. Si el material extraído durante el periodo 1962-1987 fue de casi 1 millón de m³, ¿por qué su efecto en términos de pérdida de material es de casi 2 millones de m³? ¿Puede esta diferencia de 1 millón de m³ ser explicada por las ecuaciones de transporte sólido? La Tabla 3 muestra los resultados del balance de masa. Para que el balance se verifique es necesario que el resultado de la Tabla 3 sea nulo. Nótese que la ecuación de MPM sería capaz de explicar la mayor parte del millón de m³ de diferencia entre el volumen extraído y el volumen perdido, pues sólo 0.2 millones de m³ no pueden explicarse por la diferencia entre el volumen de material que entra y sale del volumen de control. Las ecuaciones de Parker y S-J

no serían capaces de explicar prácticamente nada, mientras que E-B predice un balance todavía más desfavorable (errado).

Del análisis de los resultados se desprende que las extracciones de áridos pueden haber cambiado la dinámica del río. La extracción de áridos representa directamente la mitad del volumen total perdido aunque es indirectamente responsable de la otra mitad. A medida que el proceso de incisión avanza, los caudales que caben en el cauce principal sin desbordar por las llanuras de inundación son mayores. De esta manera, la magnitud de las tensiones tangenciales medias en el fondo, promediadas en el tiempo y en el espacio, se ven aumentadas. Se cree que esta puede ser una explicación de este fenómeno.

CONCLUSIONES

En el río Gállego se han encontrado incisiones superiores a los 5 m, en un proceso que se inició a comienzos de la década de 1970. La extracción de sus gravas (15-20 mm) es la única causa plausible de las grandes erosiones producidas. Existe en el proceso una cierta “inercia” entre la causa y el efecto, puesto que el proceso de incisión no ha acabado todavía si bien las extracciones finalizaron en 1988. La erosión del lecho parece propagarse hacia aguas arriba. Se cree que los caudales elevados de la curva de caudales clasificados y las avenidas son el nexo de unión entre causa y efecto por el papel que juegan en la activación del transporte de sedimentos y en la dinámica del río. El balance de sedimentos del periodo 1962-1987 llevado a cabo en los últimos 11 km del río sugiere que la ecuación de Meyer-Peter y Müller es la que mejor explica el proceso de incisión. La pérdida de material aluvial del río debido a la incisión (2 millones de m³ en 26 años) dobla el volumen total extraído. Este fenómeno se explica por la diferencia entre el material transportado que entra y sale del volumen de control. La extracción áridos es causa directa del proceso de incisión. La incisión sin embargo, puede aumentar la tensión tangencial media en el fondo para los mismos caudales, y de esta manera agravar el proceso de erosión del lecho.

REFERENCIAS

Martín-Vide, J.P. (2002). *Ingeniería de ríos*. Barcelona, Ediciones UPC.

Parker, G. (1990). “Surface-based bedload transport relation for gravel rivers”. *Journal of Hydraulic Research*, 28, (4), 417-436.

Rickenmann, D. (1991). “Hyperconcentrated Flow and Sediment Transport at Steep Slopes”. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*, 117, (11), 1419-1439.

Smart, G.M. (1984). “Sediment Transport Formula for Steep Channels”. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*, 110, (3), 267-276.